

1. ま え が き

岩盤における土木構造物の設計・施工を行うとき、岩盤中に発達している断層、破碎帯、節理、層理、片理などの不連続面を考慮しなければならない場合がある。特に、岩盤の斜面掘削、大規模な地下空洞、ダム基礎岩盤等における地下水浸透あるいは高エネルギー放射性廃棄物地層処分等の問題においては、不連続面に関する評価と定量化に基づく工学モデルの設定を行う必要がある。近年においては、岩盤の応力・変形、地下水浸透などの数値計算に不連続性をとり込むためのモデル化や解析手法に関する研究が進められてきている。岩盤に発達する不連続性を定量的にモデル化するためには、実際の岩盤の露頭において不連続面の方向・傾斜、間隔、長さ、間隙、挟在物などについての測定を精度良く、かつ能率的に行う必要があるが、従来この方面での研究は少ないのが現状のようである。

筆者は、岩盤に発達する不連続性の力学的モデル化を行うことを目的として、不連続面の方向・傾斜、間隔、長さに関する現場測定とデータ処理を精度良く、能率的に行う手法として「不連続性パラメータ測定システム (DISPARMS)」の開発を行った。本論では、測定の原理、現場測定、データ処理のコンピュータシステムおよび適用例について述べる。

2. 3次元写真測量法による位置座標の測定

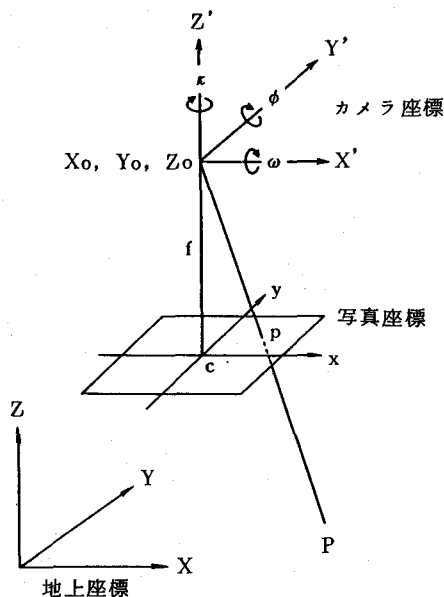
3次元写真測量法におけるセルフキャリブレーション付きバンドル法は、空中三角測量について偶然誤差のみならず系統誤差を考慮する方法として秀れた方法として知られているが、非測定用カメラを用いた地上写真測量にも極めて有効とされている。村山らによって提案されたセルフキャリブレーション付バンドル法の誤差モデルは、式(1)に示すもので、主点位置ずれ、放射方向わい曲収差、接線方向わい曲収差、フィルム変形をとり入れたものでカメラの幾何学性能が整備されていない非測定用カメラに大きい効力があるとされている。

$$dx = x_0 + x (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + (p_1 x + p_2 y + p_3 xy + p_4 y^2) \quad (1)$$

$$dy = y_0 + y (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + (p_5 xy + p_6 x^2) \quad (1)$$

ここにおいて、観測方程式は図-1を参考にして式(2)に示すものとなる。

$$x = -f \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + dx \quad (2)$$



X, Y, Z	: 地上座標軸
X', Y', Z'	: カメラ座標軸
X_0, Y_0, Z_0	: 投影中心座標
ω, ϕ, κ	: 傾き
x, y	: 写真座標
o	: 投影中心
f	: 画面距離
c	: 主点
p	: 像点
P	: 測点

図-1 カメラ座標系と地上座標系

$$y = -f \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + dy \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)における x_0 、 y_0 は主点位置づれで、 $dx=dy=0$ とすれば理想的なカメラの共線条件式を与える。
セルフキャリブレーションとは、 dx 、 dy が、ゼロでないときに考慮される誤差モデルの未知係数（内部標定要素）を外部標定要素と同時に解くことをいう。精度を表現する方法としては、一般に用いられている中等誤差、式(3)を用いる。

$$\text{中等誤差} = \sqrt{\frac{n}{2} \sum_{i=1}^n (Vx_i^2 + Vy_i^2) / (2n-r)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Vx 、 Vy ：写真上の残差、 n ：測点数、 r ：未知変数の数

測点座標の計算は式(4)により、1バンドルに対して得られる式(5)を用いて2バンドルについて最小自乗法で解くことにより測点座標が得られる。

$$\left. \begin{aligned} X-X_0 &= u(Z-Z_0) \\ X-Y_0 &= v(Z-Z_0) \\ u &= \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f}, \quad v = \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -u \\ 0 & 1 & -v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 - Z_0 u \\ Y_0 - Z_0 v \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

実際には、現場の露頭に写真-1に示すような外部標定点を設置し一般用の一眼レフカメラを用いてステレオ撮影を行うこととなる。この場合、外部標定点の座標系と他の任意の座標系との関係から任意の測点に対する任意の座標系での座標を得ることが出来る。

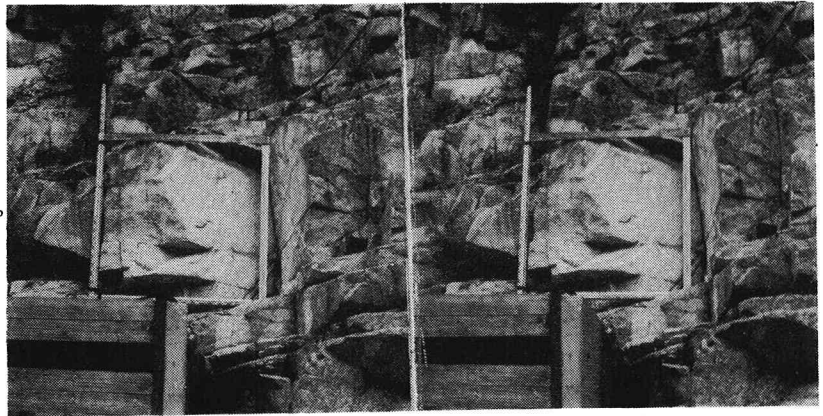


写真-1 一般カメラによるステレオ写真

ステレオ写真内で互いの計測点、外部標定点が判読

できる範囲で基線比を大きくとる。フィルムの現像後、フィルムの6倍程度の大きさの印画紙に引伸し焼付する。引伸し印画をデジタイザーにセットし、印画上の外部標定点の計測を行い、標定点の測量結果とあわせてカメラの位置と傾き、セルフキャリブレーション係数などを求める。

3. 不連続面の測定

測定を行う不連続面の量は、不連続面の走向・傾斜、間隔、長さについて計測することとした。ステレオ写真から1不連続面について5点の計測を計測し、その3次元絶対標を求める。5点のうち2点是不連続面の大きさを計測する点、残り3点是不連続面の方位を定める点とする。

不連続面の間隔は、印画上に任意のスキャンラインを設けてスキャンラインと不連続面の交叉する点の座

標を求めることにより得られる。不連続面の長さは印面上における不連続面の両端点の座標から求めることとし、これを基にして不連続面を等価な円に置き換えたときの直径 r を求めることとする。

任意の不連続面に対してその面上の任意の 5 点についての絶対座標を図-2 に示すようにとり、不連続面の大きさを r 、不連続面の法線方向単位ベクトルを $\underline{n}$ とすると、

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\underline{n} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \\ x_5 & y_5 & z_5 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 $\underline{I} = (1, 1, 1)$ として、 $\underline{I} \cdot \underline{n} < 0$ のとき、 $\underline{n} = -\underline{n}$ とする。

また、不連続面の間隔 ℓ_i はスキャンラインと不連続面の交叉する点の絶対座標を x_i, y_i, z_i とすると、

$$\ell_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, \quad i=1, n \quad \dots\dots\dots (8)$$

より求められる。

これらの計測結果を基にして、不連続面の方位に関する統計処理として、シュミットネット、ウルフネットを得ることが出来、不連続面の間隔 ℓ 、不連続面の大きさ r に関する確率密度関数を多項式近似で求めることが出来るので、確率密度関数のピークを示す点での ℓ 、 r の値あるいは積分確率密度関数における任意の超過確率を与える ℓ 、 r の大きさを求めることが可能となる。

京谷および小田らは、岩盤に発達する不連続性を連続体としての FEM にとり込んで応力・変形解析を行う方法として、各々損傷テンソル Ω_{ij} 、ファブリックテンソル F_{ij} の考え方を提唱している。

上述の方法により、不連続面の大きさ r 、法線単位ベクトル $\underline{n}$ 、間隔 ℓ を用いて、 Ω_{ij} 、 F_{ij} の値を求めることも可能である。間隔 ℓ の確率密度関数より構造最少単位の大きさ h を何らかの方法で求め、解析の対象となる岩盤の体積を V とすると、損傷テンソル Ω_{ij} 、ファブリックテンソル F_{ij} は、各々式 (9)、(10) のように求められる。

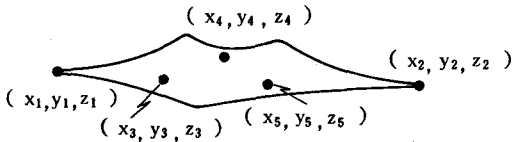


図-2 不連続面上の絶対座標

$$\Omega_{ij} = \frac{\pi \ell}{4V} \sum_{\kappa=1}^m r(\kappa)^2 n_i(\kappa) n_j(\kappa) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$F_{ij} = \frac{\pi}{4V} \sum_{\kappa=1}^m r(\kappa)^3 n_i(\kappa) n_j(\kappa) \quad \dots\dots\dots (10)$$

これらの計測とデータ処理は、全てコンピュータにより行うもので、VAX-11/750 システムおよびパーソナルコンピュータ PC-9801VM2 で可能となっている。図-3 に PC-9801 システムを示した。なお、デジタイザーの分離能は 25 μ m 程度、A₂ 版以上のサイズを必要とする。また 512KB 以上の RAM を必要とする。

以上に述べた、岩盤に発達する不連続面の計測、データ処理に関する全体の流れを図-4 に示した。ここでステップ 1 は現場における作業、ステップ 2、3 は室内作業でステップ 2 は前処理に、ステップ 3 は確率密度関数および損傷テンソル、ファブリック

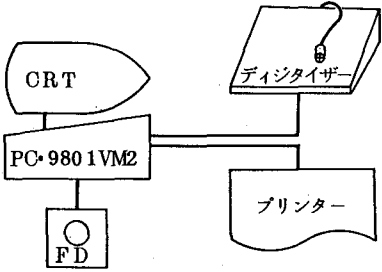


図-3 不連続面計測のコンピュータシステム

テンソルならびにステレオネットなどを求める部分となっている。

4. 適用例

ここでは、簡単のためにクラック間隔に関する適用例を示すこととする。模式的なクラック図として、山辺によるクラックパターンを用いることとし、図-5に示した。

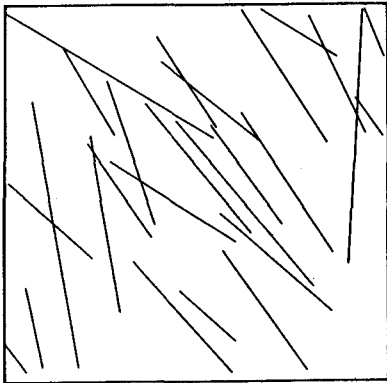


図-5 計測に用いたクラック図

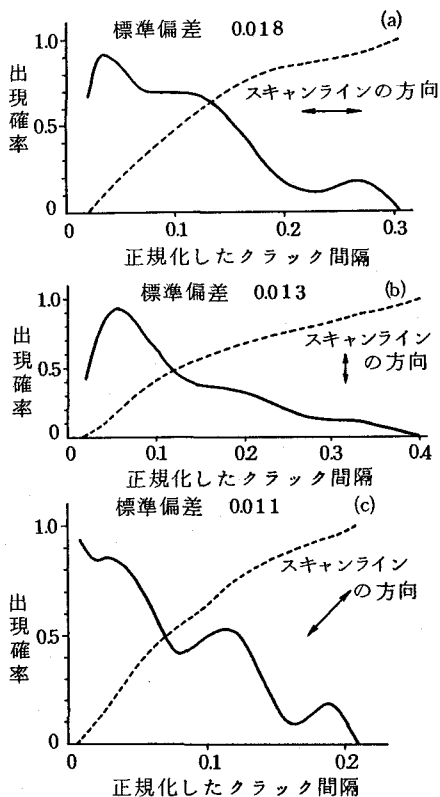


図-6 クラック間隔計測の適用例

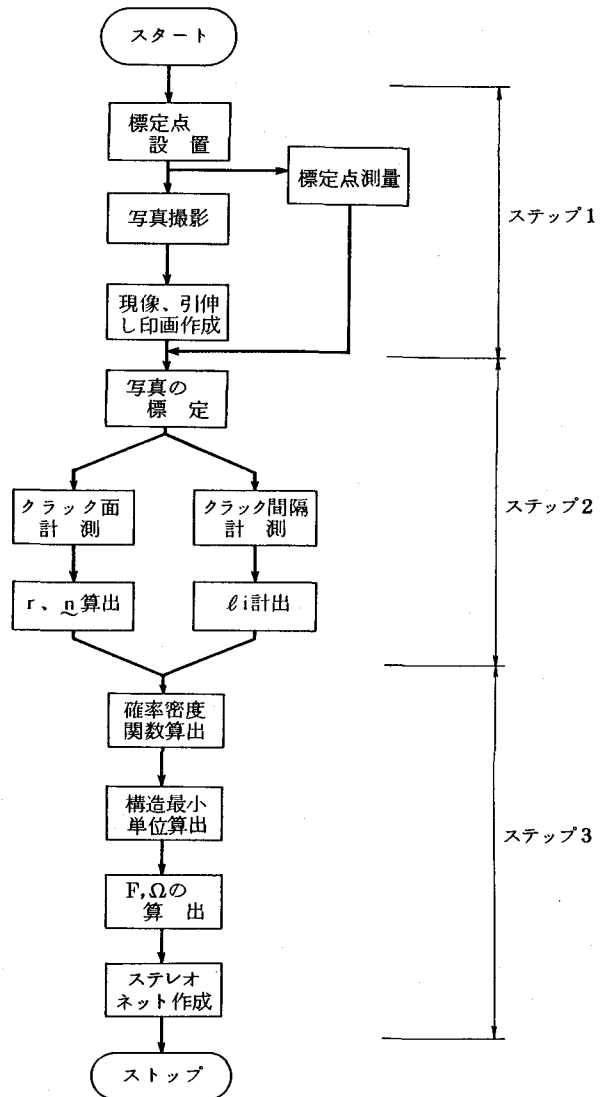


図-4 不連続面計測のフローチャート

図-6の計測におけるスキャンラインは、図-5のクラック図の辺長を10分割して設定し、間隔については辺長で正規化してある。また、図中の実線は確率密度を、破線は積分確率を示す。図-6(c)において、卓越するクラックに直交する方向に最も間隔の小さい確率密度が得られていることが読取れる。今後は、計測精度の検証、実際の露頭への適用、不連続性岩盤の解析への適用を進める所存である。なお、3次元写真測量については、村井らの開発になる日本写真測量学会プログラムPGMANを使用した。

参考文献：山辺正、クラックテンソルによる亀裂性岩盤の有限要素解析、岩盤力学シンポジウム、1985

(24) On the Discontinuity Parameter Measuring System(DISPARMS)
on the Rocks by means of Three-Dimensional Survey Method

OYO Corporation Tatsutoshi Kondoh

Discontinuity characteristics such as faults, sheared zones, joints, stratifications and shistositities subjected rocks should be sometimes considered as for the appropriate design and construction works of structures in rocks. It is especially necessary to get proper mechanical models based on the evaluations of the discontinuities developed in rocks, when we concern the problems with respect to the slope excavations, large underground caverns, water seepage through dam foundations and high energy radioactive repositories. In recent years, many techniques are proposed concerning to the analytical models in respect to the discontinuous characteristics of rocks for the numerical calculations of stress strain behavioures.

However, any appropriate research works which may get efficiently data about the orientaions, spacings, trace lengths and seam of rock discontinuities at the rock exposures does not seem to be obtained.

The author has developed the measuring technique which is available to obtain the orientations, spacings and trace lengths of discontinuities subjected rocks, in order to get practically the mechanical models concerning to the discontinuities of rocks. The measuring technique, data processing by computer and illustrative application are mentioned in this article.